# مطالعهٔ آزمایشگاهی پروفیل‌های سرعت و غلظت جریان غلیظ در قوس رودخانه*

مقاله علمی – پژوهشی

مرضیه محمدی[۱] مهدی قمشی[۲]

**چکیده** *هدف از انجام تحقیق حاضر بررسی رفتار جریان غلیظ در خم با بستر فرسایشی است. برای انجام آزمایش‌های جریان نمکی، فلومی با طول کلّی ۸/۵ متر، عمق ۷۰، عرض ۲۰ سانتی‌متر و شیب کف ۰/۰۰۱ به همراه سه قوس متوالی به شعاع انحنای ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر، ساخته شد. نتایج نشان داد در پروفیل‌های سرعت بدنه جریان نرخ افزایش سرعت به ازای افزایش غلظت، به تغییرات فرم بستر وابسته است. درنتیجه باعث کاهش سرعت بدنه جریان تا حدود ۱۹ درصد خواهند شد. سرعت پیشانی افزایش یافته است و تا جایی این افزایش سرعت ادامه یافته است که تنش برشی ذرات بستر قادر به تشکیل فرم بستر باشد. بدین‌ترتیب، با کاهش تنش برشی بستر و حذف فرم‌های بستر، نرخ افزایش سرعت پیشانی، کاهشی در حدود ٦ درصد داشته است.*

**واژه‌های کلیدی** بستر فرسایشی، جریان چگال، جریان ثانویه، خم، پروفیل غلظت، پروفیل سرعت.

## Investigation of Velocity and Concentration Profiles of Turbidity Flow in River Bends

M. Mohammadi M. Ghomeshi

**Abstract** *The purpose of this study was to investigate the behavior of high flow in bending with Erodible Bed, This paper presents a series of experiments in which saline gravity currents flowed through a sinuous channel model. This flume contains three successive bends with three different relative curvature radiuses:40, 80 and cm, 8.5 m length, 20cm width and 70cm height. The results show, in condition of a constant discharge, increasing the concentration of the inlet current, the flow velocity of the body flow increases on a mobile bed. The rate of increase in velocity depends on changes in the form of the bed the flow rate of the body will be reduced to about 19%. The velocity of the forehead has increased in the conditions of the mobile bed by forming the form of the bed. So decrease shear stress and omit the bed form cause increasing the velocity of the forehead decrease about 6%.*

**Key Words** Erodible Bed, Density Flow, Secondary Flow, Bend, Concentration Profile, Velocity Profile.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۷/۸/۲۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۸/۱۱/۱٦ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکدهٔ مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران ، اهواز.

**Eail:** mohamadi_200035@yahoo.com

(۲) استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران، اهواز.

**مقدّمه**

یکی از مسائل بسیار مهم در زمان بهره‌برداری از سدها، وجود معضل رسوب‌گذاری در مخزن آنها است. رسوب‌گذاری در مخازن سدها باعث کاهش عمر مفید سدها می‌گردد. رسوب‌گذاری مخازن یکی از مشکلات مهم در مدیریت منابع آب در دهه‌های آینده خواهد بود. استفاده پایدار از مخازن در امر مدیریت منابع آب مستلزم کنترل رسوب‌گذاری مخزن و حتّی تخلیهٔ رسوب مخزن است [1]. در حال حاضر متوسط سالانهٔ کاهش مخازن مفید در جهان به دلیل رسوب‌گذاری، بیشتر از حجم ایجادشده توسط سدهای جدید است [2].

جریان غلیظ و یا جریان چگال عبارت است از جریان یک سیّال در سیّال دیگر با چگالی متفاوت. عامل ایجاد جریان گرادیان افقی فشار است که خود ناشی از اختلاف جرم مخصوص بین دو سیّال است. این اختلاف چگالی می‌تواند ناشی از تفاوت دما، تفاوت در غلظت مواد محلول و تفاوت در غلظت ذرات معلّق باشد. در این حالت سیّال وارد شونده به درون سیّال دیگر را سیّال غلیظ و سیّال پذیرنده را سیّال پیرامون می‌نامند. اگر اختلاف چگالی ایجادشده به دلیل رسوبات معلّق باشد جریان ایجادشده را جریان کدر می‌نامند. جریان‌های غلیظ (کدر) درنتیجهٔ مومنتم و نیروی شناوری به دلیل اختلاف چگالی بین جریان‌های فرعی ورودی و مخزن دریافت‌کنندهٔ جریان به وجود می‌آیند.

جریان غلیظ می‌تواند به سه صورت مشاهده شود:

۱. زیرگذر که به‌صورت یک جریان با چگالی بیشتر از سیّال پیرامون در زیر سیّال پیرامون حرکت می‌کند؛

۲. میان‌گذر که به‌صورت یک جریان در مرز بین دو لایه سیّال، در سیّال پیرامون لایه‌بندی شده که دارای چگالی معادل با متوسط چگالی دو لایه سیّال است؛

۳. روگذر که به‌صورت جریان با چگالی کمتر از سیّال پیرامون روی سیّال پیرامون حرکت می‌کند[2].

تفاوت اساسی این دو جریان تأثیر کاهندگی سیّال محیطی روی نیروی ثقل در جریان غلیظ ا ست. شتاب ثقل کاهش یافته که عامل حرکت در جریان‌های غلیظ است با رابطهٔ (۱) بیان می‌شود:

$$g' = g\frac{\rho_d-\rho_a}{\rho_a} \qquad (۱)$$

در این رابطه `g شتاب ثقل مؤثر بر جریان غلیظ، $\rho_d$ چگالی جریان غلیظ و $\rho_a$ چگالی سیّال پیرامون است.

عدد ریچاردسون (Bulk Richardson Number) به‌عنوان نسبت شناوری به انرژی جنبشی جریان تعریف می‌شود. یک عدد ریچاردسون بزرگ به معنی حکم‌فرما بودن نیروی شناوری است؛ درنتیجه اختلاط کمتری در سطح بین جریان غلیظ و سیّال پیرامون اتّفاق می‌افتد. عدد ریچاردسون می‌تواند با استفاده از مقیاس طول و سرعت به شکل رابطهٔ (۲) بیان شود:

$$Ri_0 = \frac{g'L}{U^2} \qquad (۲)$$

که U سرعت جریان و L کلاً مقیاس طول عمودی است. عموماً عمق آب h را نشان می‌دهد.

عدد فرود دنسیمتریک: شبیه عدد فرود ا ست. عدد فرود دن سیمتریک عکس مجذور عدد ریچارد سون کلّی است.

$$Fr_d = \frac{U}{\sqrt{2g'h\cos\theta}} \qquad (۳)$$

در این رابطه $Fr_d$ عدد فرود دنسیمتریک است. این رابطه اغلب نیروی گرانشی مقاوم در برابر اختلاط را نسبت به نیروی اینرسی جریان بیان می‌کند. حرکت جریان غلیظ باعث کشش و ورود سیّال پیرامون به درون جریان می‌گردد که شدّت ورود سیّال با پارامتر شدّت

اختلاط بیان می‌شود. شدّت ورود سیّال تابعی از عدد ریچاردسون است که می‌توان آن را با رابطهٔ (٤) محاسبه نمود:

$$E_W=f(R_i) \qquad (٤)$$

در این رابطه $E_W$ شدّت اختلاط و $R_i$ عدد ریچاردسون است. در جریان غلیظ برای به دست آوردن عمق و سرعت جریان نیاز به انتگرال‌گیری در عمق جریان (z) دارد. همچنین غلظت در امتداد قائم دارای تغییرات تدریجی است. روابط (٥، ٦ و ٧) برای به دست آوردن متوسط غلظت در عمق $C_s$، سرعت متوسط U و عمق h و ارائه شده است [3]:

$$\overline{C_s}=\frac{\int_0^\infty C_s\, u\, dz}{\int_0^\infty u\, dz}=\frac{\int_0^{h_t} C_s u dz}{\int_0^{h_t} u dz} \qquad (٥)$$

$$\bar{U}=\frac{\int_0^\infty u^2 dz}{\int_0^\infty u dz}=\frac{\int_0^{h_t} u^2 dz}{\int_0^{h_t} u dz} \qquad (٦)$$

$$\bar{h}=\frac{\left(\int_0^\infty u dz\right)^2}{\int_0^\infty u^2 dz}=\frac{\left(\int_0^\infty u dz\right)^2}{\int_0^{h_t} u^2 dz} \qquad (٧)$$

در این روابط u سرعت جریان و h ارتفاعی که در آن سرعت برابر صفر می‌شود.

جریان غلیظ دارای شکلی مشابه جت دیواره است. در جت دیواره دو رژیم دیواره و جت قابل تشـــخیص است (شکل ١). در این شکل $h_{max}$ در حقیقت ارتفاعی است که در آن سرعت ماکزیمم است یعنی $u= U_{max}$. دو رژیم یادشدهٔ بالا عبارت‌اند از:

١. در رژیم دیواره $z < h_{max}$ توســـط رابطهٔ لگاریتمی توزیع سرعت به‌صورت زیر است [4].

$$\frac{u(z)}{u_*}=\frac{1}{k}\ln z+cte \qquad (٩)$$

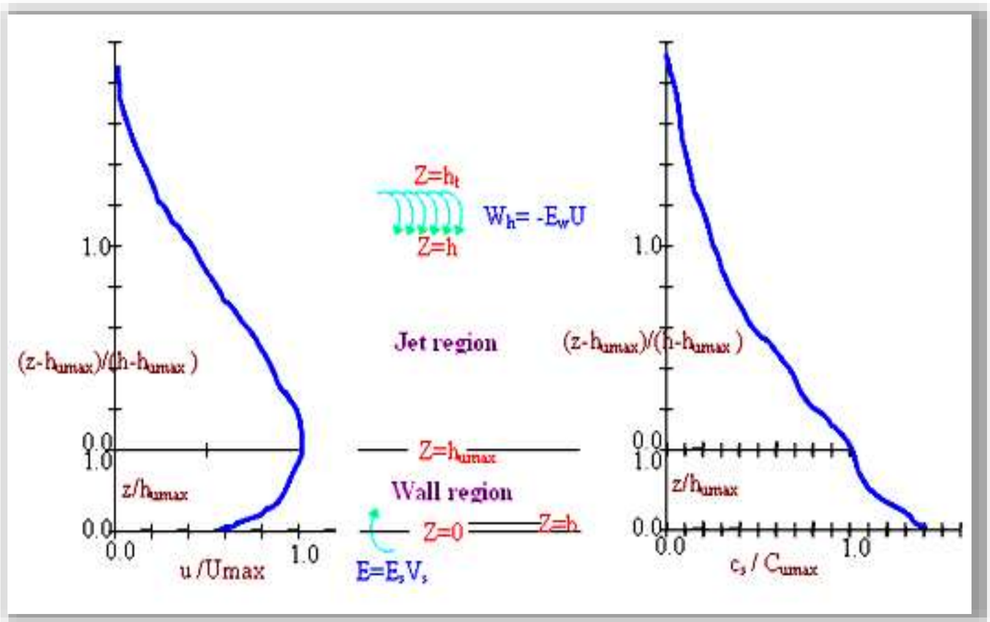
یا توسط رابطهٔ نمایی:

$$\frac{u(z)}{U_{max}}=\left(\frac{z}{h_{max}}\right)^n \qquad (١٠)$$

٢. در رژیم جــت $z > h_{max}$ توســـط رابطـهٔ near-Gaussian:

$$\frac{u(z)}{U_{max}}=\exp\left[-\alpha\left(\frac{Z-h_{max}}{h-h_{max}}\right)^\beta\right] \qquad (١١)$$

در این رابطه $\alpha = 1/4$ و $\beta = 2.5$ پیشنهاد می‌شود [4]




شکل (١): شماتیک پروفیل‌های بی‌بعد سرعت و غلظت در جریان غلیظ [4]

در تحقیقات انجام‌شده با استفاده از جریان غلیظ نمکی در یک معبر زیر آبی برای برداشت پروفیل سرعت از سرعت‌سنج داپلر اکوستیک استفاده شد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد بر خلاف جهت جریان ثانویّه در رودخانه‌ها که به سمت ساحل داخلی است، جهت جریان ثانویّه در معبر زیر آبی معکوس بوده و از ساحل داخلی به سمت ساحل خارجی است. تغییرات جریان اصلی و تنش برشی کل بر شکل‌گیری و گسترش انباشتگی در ساحل داخلی در معبرهای زیر آبی مؤثر خواهد بود و درنهایت ممکن است بر تغییر شکل این کانال‌ها نیز اثر گذارد [5]. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها با افزایش ارتفاع دریچهٔ ورودی، عدد فرود چگالی جریان ورودی کاهش پیدا می‌کند؛ بنابراین پرش هیدرولیکی کوچک‌تری لازم است تا این جریان فوق بحرانی را به حالت زیر بحرانی برساند. ازاین‌رو جریان گل‌آلود در طول کانال با عدد فرود بالاتری به جریان خود ادامه می‌دهد. در این حالت ضخامت جریان گل‌آلود در طول کانال کاهش یافته و سرعت جریان افزایش می‌یابد. فیروزآبادی و همکاران در یک مطالعهٔ آزمایشگاهی به‌وسیله دستگاه ADV پروفیل سه‌بعدی سرعت جریان را برداشت و آن را با مدل ریاضی k-ε مقایسه نمودند. نتایج حاصل از تحقیق تطابق خوبی بین مدل آزمایشگاهی و مدل عددی نشان می‌دهد [6].

کشتکار و همکاران پروفیل‌های سرعت و غلظت جریان گل‌آلود در حالت دوبعدی و در یک مدل فیزیکی در محدودهٔ حالت‌های زیربحرانی تا فوق بحرانی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع بازشدگی دریچهٔ زیرگذر ورودی، منجر به افزایش سرعت جریان و کاهش ضخامت جریان گل‌آلود می‌گردد که این پدیده به‌نوبهٔ خود افزایش میزان اختلاط ذرات سیّال محیطی و کاهش مقادیر غلظت جریان را در پی خواهد داشت. همچنین نتایج نشان می‌دهد که ارتفاع معادل سرعت متوسط جریان در ارتفاعی برابر با ۰/۸ ضخامت متوسط جریان و ارتفاع نظیر غلظت متوسط جریان در ارتفاعی معادل با ۰/۳۵ تا ۰/۵ برابر ضخامت متوسط جریان اتّفاق می‌افتد[7]. سکویروس و همکاران با یک سری آزمایش‌های جریان غلیظ نمکی و رسوبی بر روی بستر متحرک شکل‌گیری فرم بستر را مورد مطالعه قرار داده و اثر زبری و فرم بستر ایجادشده بر روی پروفیل‌های سرعت و مقدار افزایش غلظت از طریق بستر متحرک را مورد بررسی کیفی قرار دادند. آنها نشان دادند که شکل‌گیری فرم بستر در رژیم‌های مختلف با یکدیگر متفاوت بوده و اثر متفاوتی نیز بر روی پروفیل سرعت در نزدیک بستر (بخش دیواره از پروفیل سرعت جریان غلیظ) و فاصلهٔ عمودی محل قرارگیری سرعت بیشینه دارد [8]. شریفی‌نژاد با انجام آزمایش‌های جریان غلیظ نمکی بر روی بستر متحرک شکل‌گیری فرم بستر را مورد مطالعه قرار داده و اثر زبری و فرم بستر ایجادشده بر روی پروفیل‌های سرعت و غلظت از طریق بستر متحرک را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد تشکیل فرم‌های بستر بر توزیع غلظت جریان غلیظ در عمق نیز تأثیرگذار است. به‌طوری‌که با تشکیل فرم بستر، باعث کاهش غلظت بدنهٔ جریان غلیظ و یکنواخت شدن توزیع آن در عمق خواهد شد [9]. کاهه و ورجاوند جریان غلیظ بر روی بستر زبر را بررسی کردند نتایج این تحقیقات نشان داده است که تغییرات زبری بستر بر روی خصوصیات جریان غلیظ مانند پروفیل سرعت و غلظت، سرعت پیشانی، ضریب ورود و میزان ته‌نشینی اثرگذار خواهد بود [10,11].

## الگوی جریان در قوس

قبل از ورود به خم، جریان موجود در رودخانه، جریانی طولی بوده و فاقد جریان عرضی است. در این حالت پروفیل سرعت در راستای عرض رودخانه به‌گونه‌ای است که ماکزیمم مقدار سرعت در محور مرکزی رودخانه است. در راستای قائم نیز سرعت آب در نزدیکی کف بستر به دلیل مقاومت در مقابل جریان کمتر از سرعت در سطح آب است. با ورود جریان به قوس

رودخانه، ذراتی که در حال حرکت در خم هستند، علاوه بر نیروی ثقل تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز قرار گرفته که می‌خواهند آنها را از مسیر مستقیم منحرف نماید. ازآنجایی‌که توزیع سرعت در مقطع نامتقارن است، نیروی گریز از مرکز (F) در عمق ثابت نبوده و در هر نقطه تابع سرعت جریان است. در لایه‌های نزدیک به سطح آب به دلیل سرعت بیشتر، ذرات با نیروی بیشتری به طرف دیوارهٔ قوس بیرونی کشیده می‌شوند. نیروی فشاری خالص وارد بر همان جرم واحد سیّال در امتداد r به‌صورت معادلهٔ (۹) است:

$$P = -\gamma \frac{\partial h}{\partial r} \quad (۹)$$

در این رابطه h درواقع همان ارتفاع سطح آزاد جریان است. مقدار متوسط F و P به‌تقریب با هم برابرند. مقدار نیروی گریز از مرکز با زیاد شدن ارتفاع و افزایش سرعت ناشی از آن افزایش می‌کند؛ این در حالی است که مقدار P به‌طورکلّی با z تغییر نمی‌کند؛ بنابراین در بخش بالایی مقطع $P < F$ و در بخش پایین آن $P > F$ است. این حالت موجب حرکت چرخشی جریان در عرض مقطع، جریان ثانویّه (Secondary flow) خواهد بود [12]. اندرکنش جریان ثانویّه و مؤلفهٔ طولی سرعت موجب تشکیل جریان حلزونی (Helical flow) در طول قوس می‌گردد.

آبد و همکاران جریان ثانویه ناشی از عبور جریان غلیظ نمکی از کانالی با پیچ‌وخم زیاد را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد پروفیل قائم سرعت در امتداد جریان و اختلاف چگالی نسبی جریان غلیظ زیرگذر مرتباً با عدد فرود دنسیمتریک (Fd) تغییر می‌کند. هنگامی‌که عدد Fd کاهش می‌یابد، ماکزیمم سرعت در رأس خم به سمت محل تلاقی جریان غلیظ با محیط پیرامون میل می‌کند و پروفیل اختلاف چگالی نسبی اضافی به‌جز در محل تلاقی یکنواخت‌تر می‌شود. هنگامی‌که Fd افزایش پیدا می‌کند، سرعت ماکزیمم مماس به سمت بستر متمایل می‌شود [13]. آبد و همکاران در آزمایش‌های خود به سه دامنه عدد فرود دنسیمتریک دست یافتند که سه رژیم جریان را از هم متمایز می‌سازد:

۱. رژیم بالایی با عدد فرود دنسیمتریک بالا که تقریباً همه‌ی اعداد در محدودهٔ جریان فوق بحرانی وجهت جریان ثانویّه معکوس است (به سمت ساحل بیرونی)؛
۲. رژیم متوسط با مقادیر متوسط عدد فرود دنسیمتریک جهت جریان ثانویّه نرمال (به سمت ساحل داخلی) بوده و جریان می‌تواند زیر بحرانی و یا فوق بحرانی باشد؛
۳. رژیم پایینی با عدد فرود دنسیمتریک پایین که جریان زیر بحرانی بوده و جهت جریان ثانویّه معکوس است [14].

تحقیقات آزمایشگاهی و صحرایی زیادی روی جنبه‌های مختلف جریان‌های غلیظ در مسیر مستقیم صورت گرفته است در کانال‌های قوسی ورود جریان غلیظ به قوس‌ها موجب تغییر قابل توجّهی در شکل جریان غلیظ و درنتیجه الگوی جریان غلیظ در قوس می‌شود. تنها تعداد کمی از این مطالعات بر روی بستر غیر ثابت (متحرک) انجام شده است. به‌طوری‌که وقتی شکل بستر توسعه پیدا کرده، اثر آن بر مشخصات جریان ورودی ارزیابی نشده است. درواقع، فرم بستر مکانیسم بازخوردی دارد و بر جریانی که آن را ایجاد کرده است، اثر خواهد گذاشت [15]. همچنین، طبق نظر ژو، یکی از مهم‌ترین دلایل تفاوت نتایج داده‌های صحرایی با نتایج آزمایشگاهی، ایجاد فرم‌های بستر در شرایط طبیعی و بستر رسوبی است [16]. همچنین، نتایج تحقیقات انجام‌شده نشان می‌دهد که پروفیل سرعت و غلظت جریان، علاوه بر آب‌شستگی به پارامترهای هیدرولیکی و هندسی جریان، به دانه‌بندی بستر و تنش‌های برشی ناشی از آن نیز وابسته است [17]. آزمایش‌های جریان غلیظ زیررونده را با محلول نمکی و دو نوع دانه‌بندی بستر (با میانگین هندسی ۱۰۰ و ۱۸۰ میکرومتر) نشان داد به‌طورقطع یک جریان با دبی معین می‌تواند به مقدار قابل توجّهی رسوبات کف را معلق کند. به‌طوری‌که دبی

شناوری را به بیش از ۱۰ درصد افزایش دهد و نیز تجزیه‌وتحلیل تنش برشی بستر، اهمّیّت اصطکاک و نیروی دراگ را نشان داد [18]. مطالعهٔ جریان غلیظ رسوبی و نمکی در هر دو رژیم زیر بحرانی و فوق بحرانی نشان داد فرم بسترهای تشکیل شونده اثر بازخوردی دارند و درواقع بر روی جریان تولیدی خود اثر می‌گذارند [19]. برای اوّلین بار بررسی کامل مقاومت و انتقال بار بستر در جریان غلیظ زیر رونده با سه حالت جریان نمکی، رسوبی و ترکیبی، با تشکیل چهار فرم بستر در رژیم‌های جریان زیربحرانی و فوق بحرانی انجام شدند. طبق نتایج به‌دست‌آمده روابط انتقال رسوب حاصل از داده‌های آزمایشگاهی تطابق خوبی با روابط موجود در کانال‌های باز دارند. همچنین، مقایسه داده‌های صحرایی به کمک پارامترهای شیلدز و عدد فرود دنسیمتریک دلیل محکمی بر کاربرد روابط آزمایشگاهی است [15].

بنابراین، نادیده گرفتن رسوبات بستر موجب می‌شود که اثر متحرک بودن رسوبات کف و یا تشکیل فرم‌های بستر نادیده گرفته شود و نتایج آزمایشگاهی با خطا همراه شود. بنابراین، با توجّه به اهمّیّت نقش بستر رسوبی در تحلیل مشخصات جریان غلیظ و نزدیک شدن به نتایج واقعی‌تر در طبیعت، رفتار جریان غلیظ در قوس با بستر فرسایشی، بررسی چگونگی رسوب‌گذاری در قوس‌ها و مقایسه خصوصیات جریان در شعاع انحنا ملایم، متوسط و تند از اهمّیّت بالایی برخوردار است. این جریان‌ها مکانیزم اصلی انتقال جریان‌های رودخانه‌ای، ساحلی و ذرات کف اقیانوس به آب‌های عمیق‌تر است. ازاین‌رو، این جریان‌ها مسئول شستشوی تنگه‌های زیردریایی و همین‌طور تشکیل مخروط افکنه‌های بسیار وسیع در دهانهٔ بیشتر تنگه‌ها هستند.

## مواد و روش‌ها

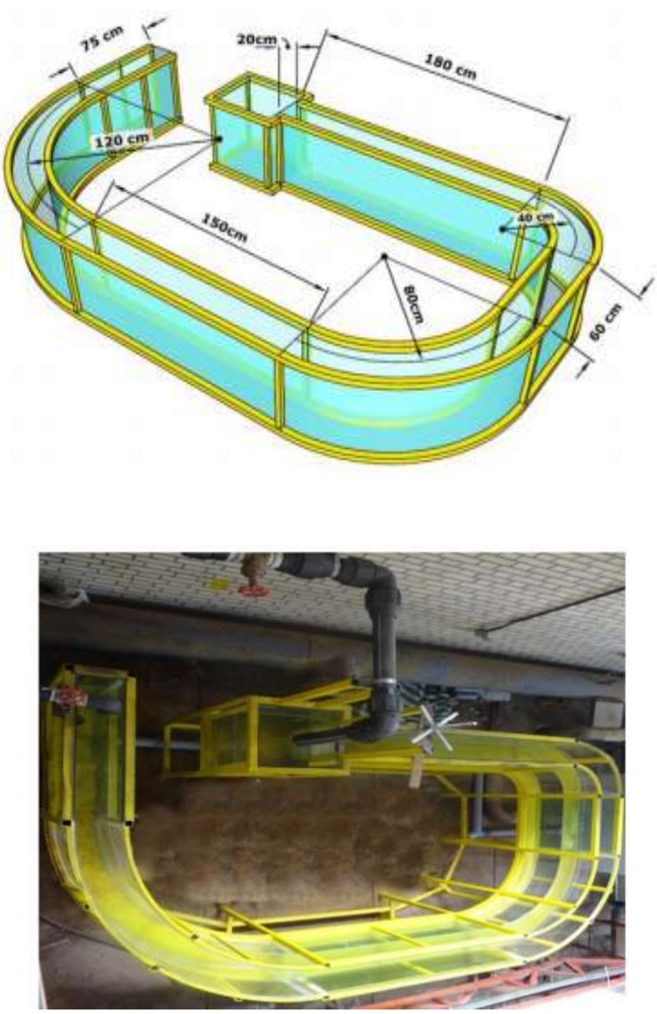
آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. این آزمایش‌ها در فلومی با طول کلی ۸/۵ متر، عمق ۷۰ سانتی‌متر، عرض ۲۰ سانتی‌متر و شیب کف ۰/۰۰۱، دارای سه خم متوالی ۹۰ درجه به شعاع انحنای ٤۰، ۸۰ و ۱۲۰ انجام شد (شکل ۳). برای انجام این آزمایش‌ها از نمک طعام و مادهٔ رنگی حلّال در آب برای ایجاد سیّال غلیظ استفاده گردید. علّت استفاده از مادهٔ رنگی به همراه محلول آب و نمک برای تشخیص سیّال غلیظ (محلول آب و نمک) از سیّال پیرامون (آب شهری) و قابل‌رؤیت بودن آن است. آزمایش‌ها به‌صورت جریان نمکی و در چهار دبی ۰/۷، ۱، ۱/۵ و ۲ لیتر در ثانیه و در غلظت‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ گرم در لیتر صورت پذیرفت. به دلیل کم بودن حجم مخزن‌های اختلاط به‌تنهایی (۲۰۰۰ لیتر) سیّال غلیظ( محلول آب، نمک و ماده رنگی) تهیه‌شده در دو مخزن اختلاط آماده و به‌طور جداگانه توسط پمپ از هر مخزن سیّال غلیظ به یک هد تانک با ارتفاع ثابت به‌صورت پیوسته تا پایان آزمایش‌ها منتقل می‌گردد. برای تهیهٔ بستر متحرک در کف فلوم رسوباتی از جنس پلی استایلن با چگالی ۱/۰۱۳ با ارتفاعی در حدود ۸ سانتی‌متر در فاصله یک متری از دریچه پس از یک سطح شیب‌دار ملایم که به‌عنوان آرام‌کنندهٔ جریان عمل می‌کند قرار گرفته است (شکل ۲).



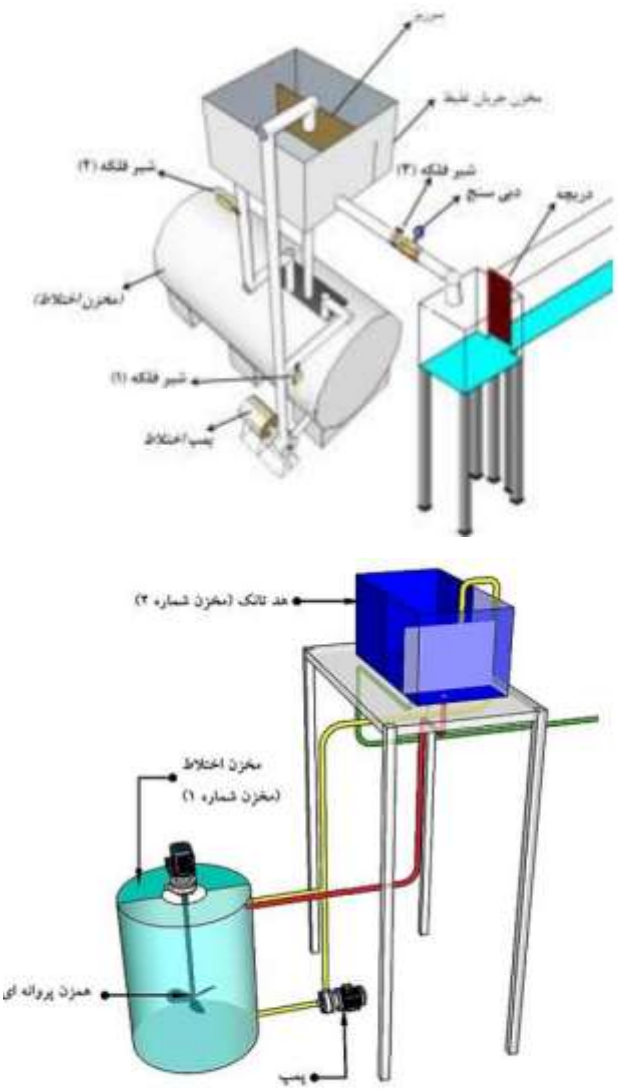
شکل (۲): آرام‌کنندهٔ ابتدای فلوم

پیش از ورود جریان غلیظ، فلوم به‌طور کامل آبگیری شده و شیرفلکهٔ ورود سیّال غلیظ به محوطهٔ پشت دریچهٔ فلوم باز می‌شود. (در انتهای ۵۰ سانتی‌متری ابتدایی کانال یک دریچه برای عبور جریان غلیظ تعبیه

شده ا ست. با گ شودن این دریچه جریان غلیظ در کف فلوم و در زیر آب ســـاکن بـه حرکـت درمی آیـد.) اندازه‌گیری دبی ورودی از طریق دبی‌سنج و تنظیم آن از طریق شیرفلکهٔ یاد شده صورت می‌گرفت. پس از تنظیم دبی به‌محض آنکه سطح سیّال غلیظ پشت دریچهٔ فلوم برابر با ســطح ســیّال پیرامون می‌گشــت دریچهٔ فلوم به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر گ شوده می شد. بدین شکل جریان غلیظ با دبی تنظیم‌شـــده وارد فلوم می‌گشـــت. حرکت جریان غلیظ زیر ســیّال محیطی آغاز و پس از رســیدن رأس جریان غلیظ به انتهای فلوم شــیرفلکهٔ انتهای فلوم (شــیرفلکهٔ تخلیه) باز شــده و رأس جریان و تلاطم‌های آن تخلیه می‌گردید. در این حالت بخشی از سیّال ساکن نیز از فلوم خارج می شود برای ثابت نگه‌دا شتن سطح آب ســاکن، شــیرفلکهٔ ورودی آب تمیز به فلوم باز و مقدار آب لازم به فلوم اضافه می شد تا مانع از افت تراز آب گردد (شــکل ٤). برای جلوگیری از به وجود آمدن تلاطم در این ناحیه تیغهٔ آرام‌کنندهٔ جر یان در انتهای فلوم نصـــب گردید. بعد از تخلیهٔ کامل رأس جریان و حصــول اطمینان از یکنواخت بودن بدنهٔ جریان در طول فلوم، ارتفاع جریان غلیظ در هر قوس در فاصـــلهٔ ۱۰ سانتی‌متری در طول فلوم در دو دیوارهٔ داخلی و خارجی قرائت و ثبت گردید.




شکل (۳): شماتیک فلوم مورد استفاده و نما از بالا فلوم



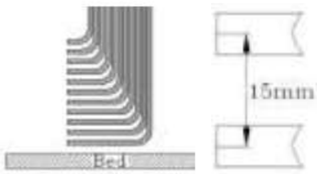

شکل (٤): مخزن‌های اختلاط

به‌منظور برداشت ارتفاع بدنه ارتفاع جریان غلیظ از اشل با دقّت یک میلی‌متر استفاده گردید. در دیوارهٔ داخلی و خارجی هر سه قوس، خط‌کش‌های تلقی به فاصلهٔ ۱۰ سانتی‌متر نصب شده‌اند. برای اندازه‌گیری سرعت از سرعت‌سنج داپلر اکوستیک (ADV) مدل Vectrino+ استفاده شده است شکل (۵). این دستگاه می‌تواند نوسانات سرعت را در یک بازهٔ زمانی مشخص در سه راستای عمود بر هم ثبت و به محیط نرم‌افزار Excel انتقال و برنامه‌ای تنظیم شد تا بتواند با میانگین‌گیری از بین اعدادی با correlation>70 و SNR>15 متوسط هر یک از مؤلفه‌های سرعت را برآورد نماید. برای هر نقطه به‌طور متوسط ۳۰۰۰ داده توسط نرم‌افزار ثبت شده است. در این تحقیق با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج صوتی (ADV) مؤلفه‌های سرعت (u، v، w) در ٤۸ نقطه (٤ نقطه در عرض و ۱۲ نقطه در عمق) در هر مقطع عرضی اندازه-گیری و ذخیره شد. مدّت زمان ذخیرهٔ مؤلفه‌های سرعت لحظه‌ای در هر نقطه ۲۰ تا ۳۰ ثانیه به طول انجامید؛ داده-برداری دستگاه ADV در راستای ارتفاع از بالا به پایین صورت گرفت. سپس سنسور دستگاه به سمت نقطهٔ بعدی جابه‌جا شد و این عمل تا کامل شدن پروفیل سرعت ادامه می‌یافت. سرعت‌ها نیز در محور کانال و در محل برداشت غلظت اندازه‌گیری شده‌اند. به‌منظور

برداشت پروفیل قائم غلظت از بدنه جریان غلیظ، شش سری سیفون نمونه‌گیری در ابتدا و انتهای هر قوس نصب گردید. هر سیفون نمونه‌گیری شامل ١٤ لوله خمیده مسی به قطر ٤ میلی‌متر بوده و فاصلهٔ مرکز آنها در جهت قائم ١٥ میلی‌متر است. در انتهای هر لولهٔ مسی یک شیلنگ پیزومتری متصل شده و سر دیگر آن به یک سرنگ ٦٠ سی‌سی ختم می‌گردد شکل (٦). پس از نمونه‌برداری سرنگ‌ها داخل ظروف پلاستیکی تخلیه و جهت قرائت EC به آزمایشگاه کیفیت آب منتقل می‌شد. در این تحقیق در هر خم ١٦ آزمایش و درمجموع ٤٨ آزمایش انجام شده است.



شکل (٥): دستگاه سرعت‌سنج صوتی (ADV)






شکل (٦): بستر متحرک در کف فلوم رسوباتی (جنس پلی استایلن) و طرز قرار گرفتن سیفون‌ها

## آنالیز ابعادی

به‌منظور مطالعهٔ رفتار جریان غلیظ در خم متغیرهای حاکم بر جریان را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود:

١. خصوصیات مربوط به هندسه‌ی سیستم: شیب کانال اصلی ($S_0$)، عرض کانال (b)، شعاع قوس ($r_m$)، زاویهٔ مرکزی قوس (θ).

٢. خصوصیات مربوط به سیستم جریان غلیظ: پارامترهای مستقل جریان در سیستم جریان غلیظ: شتاب ثقل (g)، جرم مخصوص جریان غلیظ ($\rho_d$)، دبی جریان غلیظ در واحد عرض (q)، لزجت سینماتیکی جریان (ν)، پارامترهای وابسته جریان: سرعت پیشانی جریان ($U_f$)، سرعت بدنه (U)، ضخامت پیشانی ($H_f$)، ضخامت بدنه (h)، عمق نقطه غوطه‌وری ($h_p$).

٣. خصوصیات مربوط به سیّال محیطی: ارتفاع آب ساکن در فلوم (H)، جرم مخصوص سیّال محیطی ($\rho_a$) و سرعت ورود سیّال پیرامون به بدنه جریان غلیظ ($W_e$).

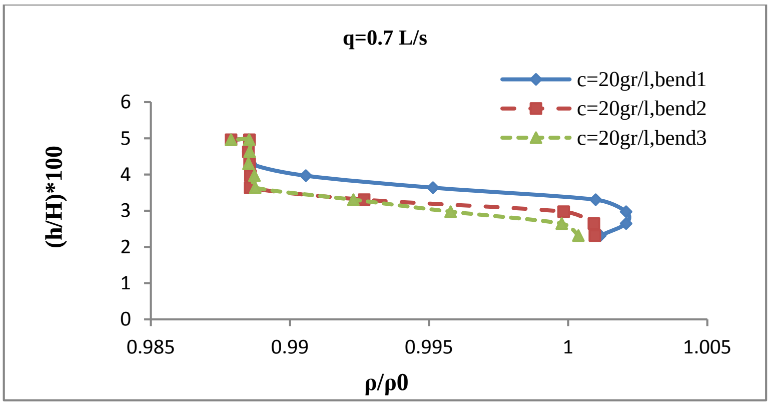
٤. خصوصیات مربوط به مصالح بستر: قطر متوسط ذرات رسوبی (Ds)، چگالی رسوبات ($\rho'_s$)، انحراف معیار رسوبات ($\sigma$)، ارتفاع فرم بستر ($\Delta$) و طول موج فرم بستر ($\lambda$).

در راستای هدف این تحقیق، اثر پارامتر های هیدرولیکی مؤثر (دبی جریان غلیظ و غلظت جریان ورودی)، بر مشخصات جریان غلیظ (سرعت پیشانی، سرعت متوسط بدنه) به کمک آنالیز ابعادی قابل ارزیابی خواهد بود.

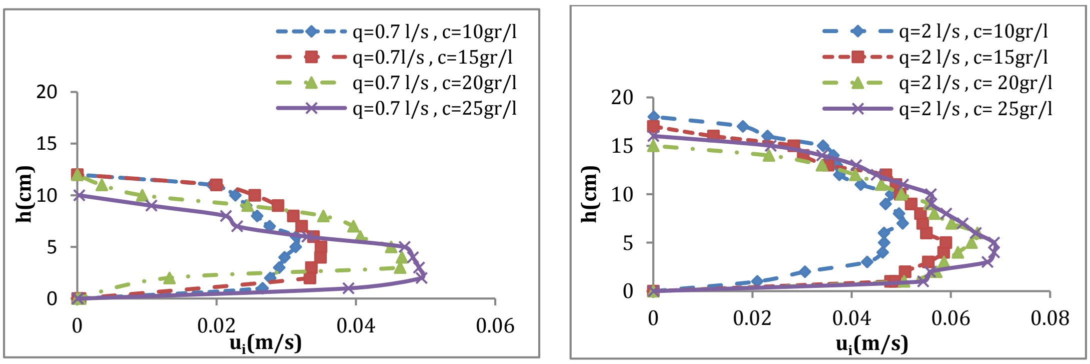
## نتایج و بحث

در این آزمایش‌ها با توجّه به ضخامت کم جریان غلیظ برداشت غلظت توسط ١٠ سیفون از کف و در ارتفاعات ١ تا ١٢ سانتی‌متری انجام گردید. ضخامت جریان غلیظ به‌وسیله ارتفاع سیّال ساکن (H = 55cm) بی‌بعد شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بیشترین مقدار غلظت در فاصلهٔ حدود ٢ سانتی‌متری از کف اتّفاق می‌افتد. پروفیل غلظت جریان تابعی از فاصلهٔ نقاط از کف

کانال بوده و با افزایش ضخامت جریان غلیظ کاهش می-یابد. غلظت نقاط اندازه‌گیری شده تا ارتفاع ٤ سانتی‌متری از کف تقریباً ثابت است و پس‌ازآن کاهش می‌یابد (شکل ۷). در یک دبی ثابت با افزایش غلظت، سرعت متوسط جریان در مسیر مستقیم و نیز سرعت در میانه‌ی خم‌ها افزایش می‌یابد. علّت این امر را می‌توان به افزایش مؤلفهٔ وزن سیّال در اثر افزایش غلظت نسبت داد. همچنین در یک دبی ثابت با افزایش غلظت سرعت در میانهٔ خم‌ها نیز افزایش می‌یابد (شکل ۸) در یک غلظت و دبی ثابت با افزایش شعاع انحنا، سرعت در رأس خم و محور مرکزی کانال به دلیل کاهش اثر نیروی گریز از مرکز افزایش می‌یابد. مقادیر سرعت متوسط جریان و عدد فرود دنسیمتریک جریان به ازای دبی‌های مختلف و غلظت‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ گرم در لیتر در جدول (۱) محاسبه گردیده است. در یک غلظت و دبی ثابت با افزایش شعاع انحنا، سرعت در میانه خم و محور مرکزی کانال به دلیل کاهش اثر نیروی گریز از مرکز افزایش می-یابد (شکل ۹). همچنین در خم سوم با نسبت شعاع انحنای ٦ به دلیل فاصلهٔ کم این خم تا محل تخلیه، جریان تحت تأثیر خروجی قرار می‌گیرد؛ درنتیجهٔ اُفت تدریجی تراز آب و افزایش سرعت ناشی از آن را خواهیم داشت که این امر افزایش سرعت ناشی از کاهش نیروی گریز از مرکز را تشدید می‌کند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده سرعت در انتهای خم دوم نسبت به میانه خم اوّل به‌طور متوسط ۲۸ درصد و در میانه خم سوم نسبت به انتهای خم اوّل به‌طور متوسط ٤٤ درصد افزایش نشان می‌دهد.



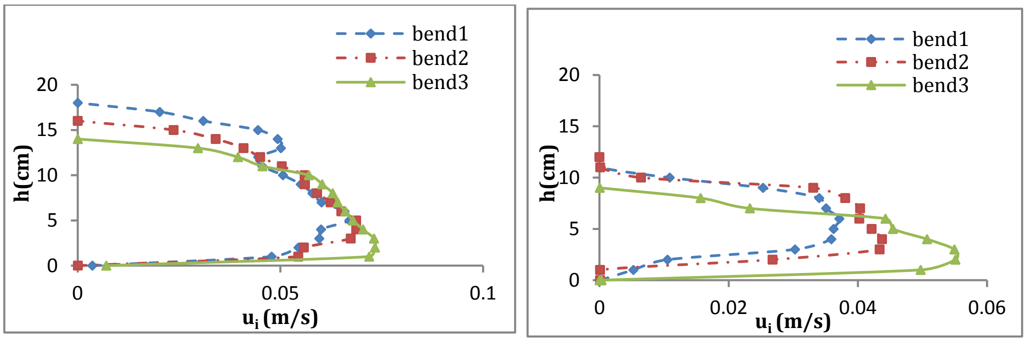

شکل (۷): موقعیت حداکثر غلظت جریان غلیظ به ازای یک دبی و غلظت ورودی ثابت در سه قوس




شکل (۸): پروفیل سرعت به ازای افزایش غلظت در دبی ۰/۷ و ۲ لیتر در ثانیه در میانه خم با نسبت شعاع انحنای ٤

جدول (۱): سرعت و عدد فرود دنسیمتریک جریان به ازای دبی ۰/۷ در غلظت‌های مورد نظر

| شماره آزمایش در هر خم | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۲ | ۳ | ٤ | ٥ | ٦ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | ۱۳ | ۱٤ | ۱٥ | ۱٦ |
| دبی جریان غلیظ (L/s) | | | | | | | | | | | | | | | |
| ۰/۷ | ۰/۷ | ۰/۷ | ۰/۷ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱/٥ | ۱/٥ | ۱/٥ | ۱/٥ | ۲ | ۲ | ۲ | ۲ |
| غلظت جریان غلیظ (g/L) | | | | | | | | | | | | | | | |
| ۱۰ | ۱٥ | ۲۰ | ۲٥ | ۱۰ | ۱٥ | ۲۰ | ۲٥ | ۱۰ | ۱٥ | ۲۰ | ۲٥ | ۱۰ | ۱٥ | ۲۰ | ۲٥ |
| عدد فرود دنسیمتریک قوس اول ($F_{d\ Bend1}$) | | | | | | | | | | | | | | | |
| ۰/۲٥ | ۰/۳۳ | ۰/۳ | ۰/۲٥ | ۰/۲۷ | ۰/۲۷ | ۰/۲۸ | ۰/۲٦ | ۰/۲۷ | ۰/۲۷ | ۰/۲۳ | ۰/۲۲ | ۰/۳٤ | ۰/٤۲ | ۰/۳۷ | ۰/٤ |
| عدد فرود دنسیمتریک قوس دوم ($F_{d\ Bend2}$) | | | | | | | | | | | | | | | |
| ۰/۳ | ۰/۳٤ | ۰/۳۷ | ۰/۳۳ | ۰/۳۲ | ۰/۳٦ | ۰/۳٥ | ۰/۳۲ | ۰/۳۳ | ۰/٤ | ۰/٤ | ۰/۳٥ | ۰/٤ | ۰/٤٥ | ۰/٤٤ | ۰/۳٦ |
| عدد فرود دنسیمتریک قوس سوم ($F_{d\ Bend3}$) | | | | | | | | | | | | | | | |
| ۰/۳۹ | ۰/٤۱ | ۰/۳٥ | ۰/۳٦ | ۰/۳٥ | ۰/٤۱ | ۰/۳٥ | ۰/۳٥ | ۰/٤ | ۰/٤۲ | ۰/۳۸ | ۰/۳۳ | ۰/٤٥ | ۰/٤٤ | ۰/۳۷ | ۰/٤۲ |




(ب) (الف)

شکل (۹): پروفیل طولی سرعت با R/B=۲، R/B= ٤ و R/B= ٦به ازای الف) دبی ۰/۷ لیتر بر ثانیه و غلظت ۲٥ گرم بزلی‌تر ب) دبی ۲ لیتر بر ثانیه و غلظت ۲٥ گرم بزلی‌تر

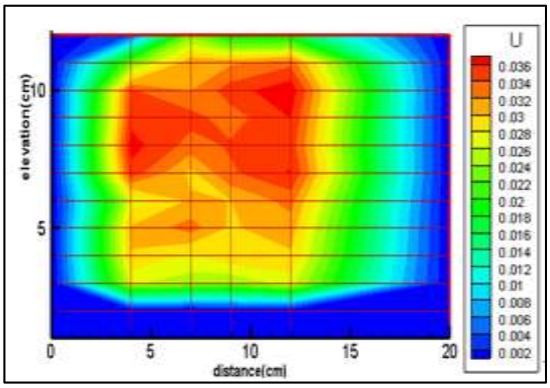
بر روی بستر متحرک، افزایش دبی ورودی جریان غلیظ نیز باعث افزایش سرعت بدنه جریان می‌شود. با توجّه به نتایج تغییرات ناشی از زبری فرم بستر با افزایش دبی جریان غلیظ ورودی بر نرخ افزایش سرعت مؤثر است. به‌عنوان‌مثال در غلظت ۲۰ گرم بر لیتر با افزایش دبی ورودی جریان غلیظ، ابتدا فرم بستر شکل گرفته و سپس فرم بسترها شروع به شسته شدن می‌کنند و زبری فرم بستر و تنش برشی آن کاهش می‌یابد. در این صورت نرخ افزایش سرعت از حدود ۲۲ درصد، در دبی ۱/٥ لیتر بر ثانیه در قوس اوّل با شعاع انحنا ۲، به حدود ۳٤ درصد، در قوس دوم با شعاع انحنا ٤ و حدود ۷۲ درصد در قوس سوم با شعاع انحنا ٦ افزایش یافته است. نرخ افزایش سرعت در غلظت ۲٥ گرم بر لیتر نسبت به غلظت ۲۰ گرم بزلی‌تر با افزایش تنش برشی کاهش یافته است (از حدود ۳٤ درصد به ۱٥ درصد رسید است).

بنابراین، بیشترین نرخ افزایش سرعت با حذف فرم‌های بستر و کاهش زبری و تنش برشی بستر رخ خواهد داد. بدین‌ترتیب افزایش غلظت سبب افزایش قدرت جریان می‌گردد، به‌طوری‌که در ابتدا، زبری و تنش برشی بستر افزایش یافته و در ادامه مجدداً با حذف فرم‌های

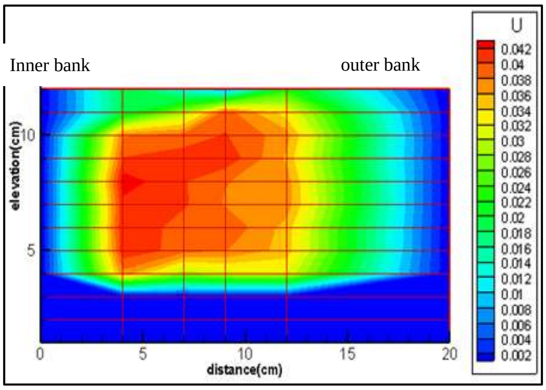
بستر کاهش می‌یابد.

با توجّه به نتایج نشان داده شده در تمامی مسیرها با افزایش دبی، سرعت جریان غلیظ افزایش می‌یابد اما موقعیت سرعت ماکزیمم در جریان غلیظ با بستر فرسایشی به دلیل تنش برشی ایجادشده بین بستر و بدنه جریان غلیظ، به سمت بالا حرکت کرده به‌عبارت‌دیگر سرعت ماکزیمم جریان غلیظ در فاصلهٔ بیشتری از بستر رخ می‌دهد.

شکل (۱۰) پروفیل عرضی سرعت در مسیر مستقیم ۱۸۰ سانتی‌متری قبل از ورود جریان به خم را به ازای دبی (l/s) ۰/۷ و غلظت (gr/l)۱۵ نشان می‌دهد. در ابتدای قوس اوّل جریان پروفیل عرضی خود در مسیر مستقیم را حفظ نکرده و تغییر نشان می‌دهد. برداشت داده‌های سرعت در خم با شعاع انحنای ٤٠ سانتی‌متر با توجّه به کوتاه‌بودن طول خم در فاصلهٔ ٥ سانتی‌متری از ابتدای خم و در خم‌های با شعاع انحنای ۸۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر در فاصلهٔ ۱۰ سانتی‌متری از ابتدای خم انجام گرفته است. با نزدیک شدن جریان به ابتدای خم، حداکثر سرعت به سمت جدارهٔ داخلی کشیده می‌شود (شکل ۱۱). در تمامی شکل‌ها سرعت برحسب (m/s) است و محور افقی فاصلهٔ نقاط از دیوارهٔ داخلی فلوم (Distance(cm)) و محور قائم ارتفاع (Elevation(cm)) رانشان می‌دهد.



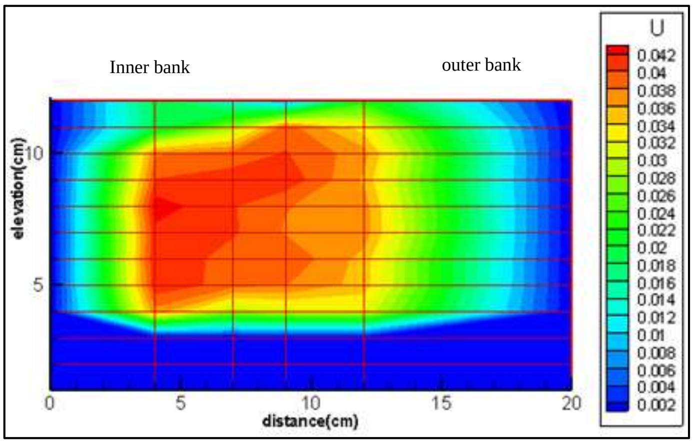

شکل (۱۰): پروفیل عرضی سرعت در مسیر مستقیم ۱۸۰ سانتی‌متری



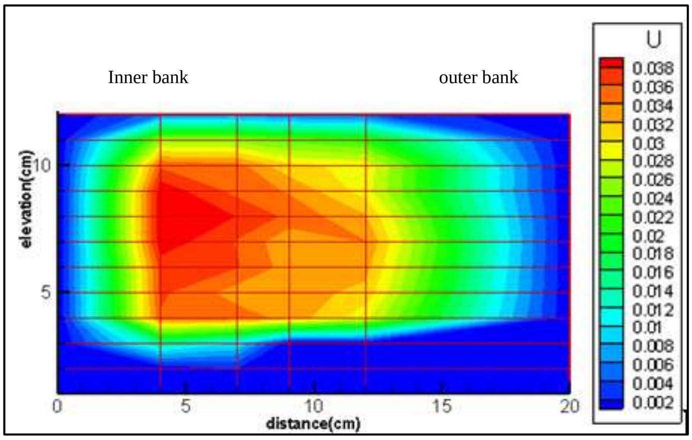

شکل (۱۱): پروفیل عرضی سرعت در ابتدای قوس اوّل

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در خم اوّل و مقطع عرضی دوم (میانه خم) حداکثر سرعت به سمت دیوارهٔ داخلی است. با ورود جریان به خم به علّت تغییر ناگهانی انحنا و اثر نیروی گریز از مرکز در امتداد جدارهٔ داخلی کاهش فشار و در امتداد جدارهٔ بیرونی افزایش فشار روی می‌دهد. آزمایش‌ها نشان داد که با حرکت جریان در طول خم، عمق جریان در امتداد دیوارهٔ داخلی کاهش و در امتداد دیوارهٔ بیرونی افزایش می یابد. در نزدیکی دیوارهٔ داخلی گرادیان فشار طولی منفی رخ داده و باعث شتاب گرفتن ذرات می‌گردد. در مقابل در نزدیکی دیوارهٔ بیرونی گرادیان فشار طولی مثبت بوده و فشار در امتداد جریان افزایش می‌یابد (شکل ۱۲).

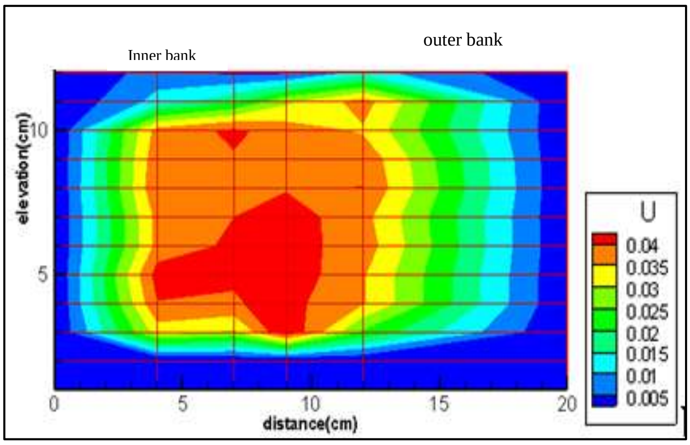
بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق و نیز سایر تحقیقات صورت گرفته مانند [4,5,9] در جریان غلیظ بر خلاف جریان در مجاری روباز جریان ثانویّه در کف به سمت دیوارهٔ بیرونی و در سطح مشترک به سمت دیوارهٔ داخلی است. جریان ثانویّهٔ ایجاد شده منجر به نزدیک شدن سرعت بیشینه به دیوارهٔ بیرونی شده و حداکثر سرعت به سمت دیوارهٔ بیرونی منتقل می‌شود. این امر در پروفیل‌های عرضی سرعت در خم دوم و سوم مشاهده می‌گردد.




(الف)



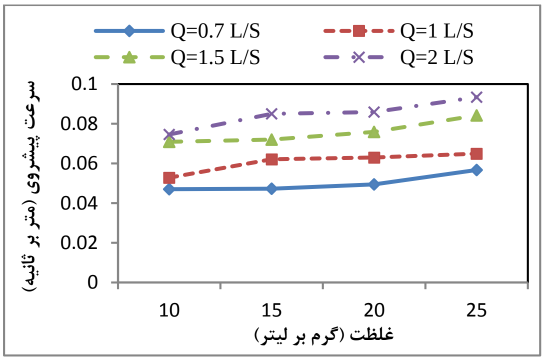

(ب)




(ج)

شکل (۱۲): پروفیل عرضی سرعت: الف) در ابتدا، ب) در میانه و ج) در انتها قوس اول با دبی ۰/۷ لیتر بر ثانیه و غلظت ۱۵ گرم بر لیتر

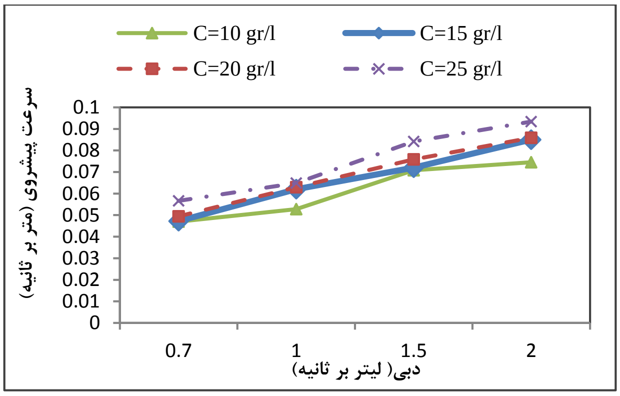
محاسبهٔ سرعت پیشانی در شرایط بستر متحرک نشان می‌دهد که در تمامی آزمایش‌ها سرعت پیشانی در شرایط بستر متحرک (با تشکیل فرم بستر) افزایش یافته است شکل (۱۳). انتظار می‌رود ذرات بستر به‌عنوان یک عامل مقاوم در مقابل جریان باشند اما در این آزمایش‌ها، ورود رسوبات کف از ناحیه زیر دماغه جریان غلیظ به داخل جریان، باعث افزایش مومنتم جریان غلیظ و کاهش جریان‌های برگشتی در مقابل جریان و درنتیجه افزایش سرعت پیشانی شده‌اند. البته این مسأله، اهمّیّت تشکیل فرم بستر در ایجاد عامل مقاومت در مقابل جریان را به‌خوبی نشان می‌دهد. چون در ابتدای حرکت جریان غلیظ، فرم بستر هنوز تشکیل نشده است و عامل مقاومت و زبری بستر ناچیز است و درنتیجه اثر مقاومتی و کاهشی در برابر سرعت پیشانی جریان وجود نخواهد داشت.



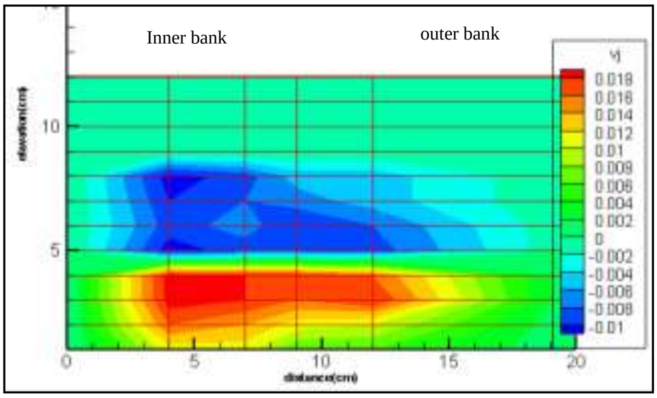

شکل (۱۳): تغییرات سرعت پیشانی جریان در دبی ثابت و غلظت‌های مختلف

با توجّه به شکل (١٤) در یک غلظت مشخص مومنتم جریان افزایش یافته و جریان برگشتی مقاوم کاهش می‌یابد و بدین‌ترتیب سرعت پیشانی افزایش یافته است. البته تا جایی این افزایش سرعت ادامه یافته است که تنش برشی ذرات بستر به حدّی باشد که قادر به تشکیل فرم بستر باشد. بدین‌ترتیب، با کاهش تنش برشی بستر و حذف فرم‌های بستر، ورود ذرات به داخل پیشانی جریان کاهش یافته و درنتیجه نرخ افزایش سرعت پیشانی، کاهشی در حدود ٦ درصد داشته است.

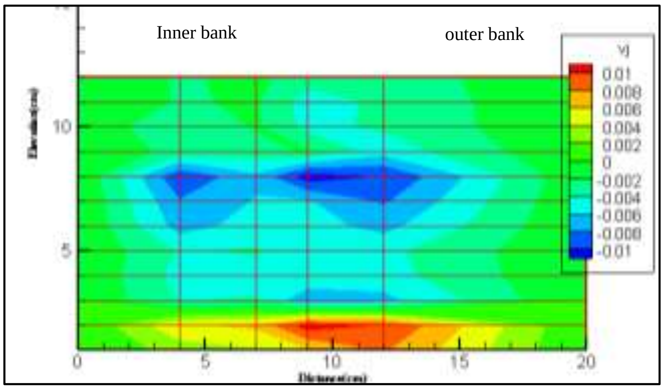
بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در (شکل ۱۵) ازآنجایی‌که نیروی گریز از مرکز در عمق ثابت نیست و در هر نقطه تابع سرعت جریان است در نزدیکی سطح آب جهت چرخش بردارهای سرعت به سمت دیوارهٔ خارجی و در کف به دلیل غالب بودن نیروی گرادیان فشاری به دلیل اختلاف تراز سطح آب جهت چرخش بردارهای سرعت به سمت دیوارهٔ داخلی خواهد بود و باعث شکل‌گیری جریان ثانویّه معکوس است. این در حالی است که موقعیت سرعت بیشینه در راستای قائم پروفیل سرعت در جریان غلیظ با بستر فرسایشی بسته به عدد فرود و تنش برشی ایجادشده بین بستر و بدنه جریان غلیظ، به سمت بالا حرکت کرده به‌عبارت‌دیگر سرعت ماکزیمم جریان غلیظ در فاصلهٔ بیشتری از بستر رخ می‌دهد.



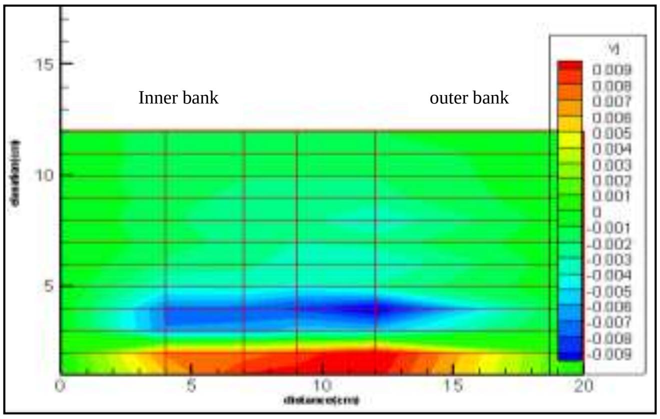

شکل (١٤): تغییرات سرعت پیشانی جریان در غلظت ثابت و دبی‌های مختلف




(الف)




(ب)




(ج)

شکل (۱۵): جهت جریان ثانویّه در میانه الف) قوس اوّل، ب) قوس دوم و ج) قوس سوم دبی ۲/۵۲ لیتر بر ثانیه و غلظت ۱۵ گرم بزلی‌تر

نیروی گریز از مرکز با شعاع انحنا رابطهٔ معکوس داشته و درنتیجه با افزایش شعاع انحنا نیروی گریز از مرکز کاهش می‌یابد. کاهش نیروی گریز از مرکز موجب کاهش جریان‌های ثانویّهٔ ناشی از آن می‌شود. این امر منجر به افزایش سرعت جریان در مسیر جریان شده و با توجّه به دائمی بودن جریان، عمق جریان غلیظ نیز کاهش می‌یابد؛ به‌طوری‌که در مقاطع عرضی خم سوم بیشترین سرعت طولی و کمترین عمق جریان غلیظ را می‌توان مشاهده نمود. در تمامی آزمایش‌های این تحقیق عدد فرود دنسیمتریک کمتر از ۱ بوده و رژیم جریان زیر

بحرانی است و جریان ثانویّه نیز معکوس است؛ ازاین‌رو نتایج حاصل از این آزمایش با نتایج حاصل از آبد و همکاران مطابقت دارد (۳).

## نتیجه‌گیری

نکتهٔ حائز اهمّیّت در پروفیل‌های سرعت بدنهٔ جریان این است که نرخ افزایش سرعت به ازای افزایش غلظت، به تغییرات فرم بستر وابسته است. با افزایش غلظت جریان غلیظ، تنش برشی بستر نیز افزایش یافته است. در شرایط بستر متحرک ذرات بستر فعّال هستند و با افزایش سرعت و تشکیل فرم‌های بستر سبب افزایش زبری و مقاومت بستر جریان می‌شوند، به‌طوری‌که ذرات بستر به‌صورت نیروی مقاوم در مقابل جریان ورودی عمل می‌کنند. درنتیجه طبق نتایج حاصل‌شده، باعث کاهش سرعت بدنهٔ جریان تا حدود ۱۹ درصد هم خواهند شد. با توجّه به نتایج در شرایط بستر متحرک عموماً با افزایش غلظت و درنتیجه افزایش سرعت جریان، قدرت جریان غلیظ نیز افزایش یافته است و سبب تغییر زبری بستر و افزایش تنش برشی بستر شده است. تا جایی که با شسته‌شدن فرم بستر، زبری و تنش برشی نیز شروع به کاهش می‌کند. در یک غلظت مشخص مومنتم جریان افزایش یافته و جریان برگشتی مقاوم کاهش می‌یابد و بدین‌ترتیب سرعت پیشانی افزایش یافته است.

## مراجع


1. Kassem, A., and Imran, J. "Three-dimensional modeling of density current. II: Flow in sinuous confined and unconfined channels", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 42, No. 6, pp. 591– 602, (2004).
2. Parker, G., Gary, M., and Toniolo, H. "Note on the Analysis of Plunging of Density Flows", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133, No. 6, pp. 690, (2007).
3. Abad, J. D., Sequeiros, O. E., Spinewine, B., Pirmez, C., García, M. H, and Parker, G., "Secondary current of saline underflow in a highly meandering channel: Experiments and theory", *Journal of Sedimentology Research*, Vol. 81, pp. 787–813, (2011).
4. Islam, M. A. and Imran, J. "Experimental modeling of gravity underflow in a sinuous submerged channel", *Journal of Geophysics Research*, Vol. 113, pp.C07041, (2008).
5. Keevil, G. M., Peakall, J., Best, J. L. and Amos, K. J. "Flow structure in sinuous submarine channels: Velocity and turbulence structure of an experimental submarine channel", *Journal of Marine Geology*, Vol. 229, No. (3–4), pp. 241–257, (2006).
6. Firoozabadi, B., Afshin, H. and Aram, E. "Three-Dimensional Modeling of Density Current in a Straight Channel , *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 135, No. 5, (2009).

۷. کشتکار، شیوا، ایوب زاده، علی، فیروزآبادی، (۱۳۸۹). "بررسی پروفیل سرعت و غلظت جریان گل‌آلود با استفاده از مدل فیزیکی. پژوهش‌های آبخیزداری"، (۸۷): ٣٦-٤٣.

8. Sequeiros, O. E., Spinewine, B., Beaubouef, R.T., Sun, T., García, M. H. and Parker, G. "Characteristics of Velocity and Excess Density Profiles of Saline Underflows and Turbidity Currents Flowing over a Mobile Bed", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 136, No. 7, pp. 412-433, (2010a).

۹. شریفی‌نژاد، اعظم، " بررسی آزمایشگاهی مشخصه‌های هیدرولیکی جریان غلیظ در شرایط بستر متحرک"، پایان نامه دکتری، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، (۱۳۹٦)

۱۰. کاهه، مهدی، " بررسی آزمایشگاهی دینامیک جریان غلیظ بر روی سطح زبر"، رساله دکتری، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، (۱۳۹٤).

۱۱. ورجاوند، پیمان، "بررسی آزمایشگاهی جریان غلیظ بر روی بسترهای زبر"، رساله دکتری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، (۱۳۹۲).

۱۲. امید، محمدحسین و حبیب زاده، علیرضا،" فرایندهای رودخانه‌ای"، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ۲۷۲صفحه، (۱۳۸۸).

13. Oehy, C. "Effects of obstacles and jets on reservoir sedimentation due to turbidity currents", PhD thesis, Fac. ENAC, Ecole Polytech. Fed. de Lausanne, Lausanne, France, (2003).

14. Corney, R.K.T., Peakall, J., Parsons, D.R., Elliott, L., Amos, K.J., Best, J.L., Keevil, G.M. and Ingham, D.B. "The orientation of helical flow in curved channels", *Journal of Sedimentology*, No. 53, pp. 249–257, (2006).

15. Sequeiros, O. E., Spinewine, B., Beaubouef, R.T., Sun, T., García, M.H. and Parker, G. "Bed load transport and bed resistance associated with density and turbidity currents", *Journal of Sedimentology*, No. 57, pp.1463–1490, ( 2010b).

16. Xu, J.P. "Normalized velocity profiles of field-measured turbidity currents", *Journal of Geology*, Vol. 38, No. 6, pp. 563-566, (2010).

17. Turner, J. S. Buoyancy effects in fluids. Cambridge University Press, Cambridge, England, (1973).

18. Parker G, Garcia M, Fukushima Y and Yu W, "Experiments on turbidity currents over an erodible bed", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 25, No. 1, pp. 123-147, (1987).

19. Sequeiros, O. E., Spinewine, B., Beaubouef, R., Sun. T., García. M., and Parker, G., "Characteristics of Velocity and Excess Density Profiles of Saline Underflows and Turbidity Currents Flowing over a Mobile Bed", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 136, No.7, pp. 412-433, (2010).